文章编号:1000-4939(2024)06-1237-08

剪切破坏过程中岩体单裂隙力学及非线性渗流特性试验研究

曹成,许增光,柴军瑞,张志华

(西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室,710048 西安)

摘 要:裂隙岩体在复杂应力和渗流环境下的物理力学特性对库坝系统岩体稳定极为重要。为了厘清剪切-渗流耦合作用下的岩体裂隙力学及渗流特性,通过制作类岩试件开展了岩体单裂隙剪切-渗流耦合试验,分析了剪切过程中裂隙剪切强度、法向位移增量、剪胀角、FORCHHEIMER 定律系数等参数的演化过程,以峰值剪切位移为分界点,基于 PATTON 强度公式以及峰后剪胀公式构建了全剪切强度计算公式。以 FORCHHEIMER 定律为基础阐明了高水压和剪切破坏共同作用下裂隙非线性渗流特性的演化过程,揭示了 FORCHHEIMER 定律线性项及非线性项系数的演化过程,建立了用于判断渗流流态的临界雷诺数计算公式。结果表明:剪切破坏产生的碎屑充填物对裂隙峰后剪切强度、剪胀角和渗流特性影响显著,构建的剪胀公式和剪切强度计算公式可确定任意时刻的裂隙剪切强度值和隙宽变化值;由于水流惯性力的影响高渗压作用下裂隙非线性渗流特性显著,剪切过程中 FORCHHEIMER 定律线性项及非线性项系数不断减小并趋于稳定,并且临界雷诺数在剪切过程中不断增大。

关键词:单裂隙;剪切-渗流耦合;剪切强度;剪切破坏;非线性渗流

中图分类号:TV223.4 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2024.06.002

Experimental study on mechanical and nonlinear seepage of single rock mass fracture with shear failure

CAO Cheng, XU Zengguang, CHAI Junrui, ZHANG Zhihua

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China,
Xi'an University of Technology, 710048 Xi'an, China)

Abstract: The stability of fractured rock mass is important for the operation of reservoir and dam system under complex stress and seepage condition. In order to clarify the fracture mechanics and seepage characteristics of rock mass with shear-seepage coupling, the shear-seepage coupling tests of single fracture were carried out by making rock-like specimens. The evolution law of the key parameters, including shear strength, increment of normal displacement, dilatancy angle and parameters of FORCHHEIMER's law, was analyzed; the peak shear displacement was set as the dividing point. The total shear strength calculation e-

收稿日期:2023-12-04 **修回日期:**2024-02-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.52209167;52179143);陕西省创新能力支撑计划项目(No.2022TD-01)
通信作者:许增光,教授。E-mail:xuzengguang@xaut.edu.cn
引用格式:曹成,许增光,柴军瑞,等.剪切破坏过程中岩体单裂隙力学及非线性渗流特性试验研究[J].应用力学学报,2024,41(6):1237-1244.
CAO Cheng, XU Zengguang, CHAI Junrui, et al. Experimental study on mechanical and nonlinear seepage of single rock mass fracture with shear failure[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(6):1237-1244.

quation was established based on the PATTON's and proposed dilatancy equations. FORCHHEIMER's law was used to analyze the non-linear seepage characteristics of fracture, the evolution law of the linear and nonlinear term coefficients of FORCHHEIMER's was revealed, and the computational formula of critical Reynold's number was proposed to determine the seepage flow regime. The results show that the filling produced by shear failure has an obvious effect on the shear strength, dilatancy angle and non-linear seepage characteristics of fracture. The established shear strength and dilatancy equations can confirm the shear strength and aperture of fracture at any time. Due to the influence of inertia force, the nonlinear seepage characteristics of fracture under high hydraulic pressure are significant. The values of two coefficients of FORCHHEIMER's are decreased and Reynold's number is increased with increased shear displacement.

Key words: single fracture; shear-seepage coupling; shear strength; shear failure; non-linear seepage

裂隙岩体是水利工程、岩土工程、地下工程等领域常见的承载介质,是大型建筑物的建设基础。涉水情况下裂隙是岩体剪切破坏和渗流的主要场所,同时也是导致岩体失稳的关键因素[1-3]。厘清裂隙岩体剪切-渗流耦合特性对工程建设极为重要[4-6]。

岩体裂隙受剪时的变形以剪切位移、剪缩、剪胀和结构面破坏为主[7-8]。剪缩和剪胀会引起隙宽变化,其变化值与裂隙面凸起结构的高度和起伏角密切相关,剪切位移值和结构面破坏范围则受裂隙面剪切强度影响较大,同时裂隙面剪切强度的计算是评价岩体稳定性的基础[9]。PATTON[10]首次将摩擦角和剪胀角代入莫尔-库伦公式提出了双直线剪切强度模型,PATTON 公式忽略了裂隙面黏结强度,并且假设裂隙面为规则齿状,后续岩体裂隙剪切强度模型均在 PATTON 公式的基础上进行修正和改善。JAEGER[11]将裂隙面黏结力引入 PATTON 公式构建了剪切强度计算公式;沈明荣等[12]通过规则齿破坏试验,确定了裂隙面摩擦角和黏聚力修正系数,完善了剪切强度计算公式;BARTON 等[13]则构建了剪胀角和 JRC 值之间的数学关系并拓展了 PATTON 公式的应用范围;唐志成和 GRASSELLI 等[14-15]则考虑了裂隙面的三维形貌特性,提出了峰值剪切强度改进模型。肖维民等[16]进行了充填裂隙剪切特性试验研究,发现剪切强度显著减小并且由充填物自身性质决定。

上述模型多关注裂隙的峰值剪切强度,这决定了裂隙产生大位移时的临界应力值[17]。峰值强度过后裂隙剪切强度将进入非线性软化阶段和残余阶段[18],该阶段剪切强度决定着裂隙峰后的抗剪能力和位移量。但目前针对裂隙峰后剪切强度研究不够深入,多以峰后软化和残余强度变化趋势研究为主,缺少考虑剪切破坏影响的定量计算模型。

此外,由于剪切过程中裂隙隙宽分布、裂隙面粗糙度、接触面积和渗流通道连通性均会发生较大变化,因此裂隙渗流特性在剪切过程中变化显著[19-20]。大量试验结果证明,由于剪胀效应的影响,裂隙渗透系数会以数量级的形式增大[21-22]。此外,由于高水头的影响,水流在裂隙中流动时惯性力起主导作用,当渗流通道宽窄不一时局部水头损失增大,使得压力梯度和渗流量之间呈现明显的非线性关系,导致经典立方定律高估裂隙的过流能力[23-24]。基于此,诸多学者开展了剪切作用下的裂隙非线性流态研究,XIONG 等[25]考虑水流惯性力作用,通过引入雷诺数建立了非线性渗流模型;陈益峰等[26]考虑了剪切变形造成的剪胀和剪切破坏引起的软化效应,提出了广义立方定律;赵延林等[27]通过定义等效剪胀水力隙宽,定量分析了线性剪胀过程,构建了考虑剪切变形影响的非线性渗流模型;VILARRASA 等[28]发现渗流方向与剪切方向的差异性会对裂隙内水流分布造成明显影响。

本研究开展不同法向荷载和水压力作用下的裂隙剪切-渗流耦合试验,基于 PATTON 强度公式以及峰后剪胀经验公式分析全剪切过程剪切强度变化规律,揭示了裂隙剪切强度和法向变形的演化规律,以 FORCHHEIMER 定律厘清了剪切破坏对裂隙非线性流态的影响规律。

1 试验过程及方法

1.1 试验设备

本研究采用的岩体裂隙剪切-渗流耦合试验设备如图 1 所示,该设备可提供荷载最大值为 600 kN;位移测量精度为 0.003 mm;水压最大值为 3 MPa;剪切位移最大值为 35 mm,并且可实现高度密封。



1—法向加载轴；2—剪切盒；3—位移传感器；
4—切向加载轴；5—进水口；6—出水口；7—油源；
8—水压系统；9—控制台；10—电子秤

图 1　岩体裂隙渗流-剪切试验设备

Fig. 1　Rock mass fracture coupled shear-seepage test equipment

1.2　试验试件

由于天然岩样较难重复试验,本研究通过以 π 定量为基础的相似理论制备类岩试样,通过量纲分析确定采用石膏、水、缓凝剂制作相似材料,质量比为 1∶0.25∶0.005,使类岩试样量纲与天然岩样保持一致且数值接近。试件物理力学参数如表 1 所示。所用试件高 75 mm,直径 200 mm,下试件圆形位置设直径为 8 mm 的进水口。试件结构面分为 2 种:带 30°起伏角的规则齿和光滑平面。2 种结构面试件及初始布置状态如图 2 所示。



图 2　试件及初始布置状态

Fig. 2　Test specimens and the initial configuration

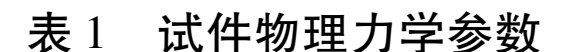


表 1　试件物理力学参数

Tab. 1　Physico-mechanical properties of test specimen

参数	数值
密度/(g · cm^{-3})	2.130
抗压强度/MPa	39.760
弹性模量/GPa	29.104
泊松比	0.234
内聚力/MPa	5.434
内摩擦角/(°)	61.734

1.3　试验过程

本研究试验采用常法向荷载加载,首先将法向荷载稳定在设置点,随后通水,出水流量稳定时保持 15 mm/min 的速率开始剪切,直到剪切位移 δ 为 32 mm时停止试验。法向应力 σ_n控制水平为 1.27、1.59、1.91、2.23、2.55 MPa,渗流压力 P 控制水平为 0.2、0.4、0.6 MPa。

2　剪切特性分析

2.1　法向位移及剪切强度演化规律研究

固定 P = 0.6 MPa,不同法向应力 σ_n影响下试件破坏结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出,剪切过程中所有试件规则齿均被破坏,产生的碎屑充填物分布在裂隙中;并且 σ_n越大,破化程度越高,充填物体积和堆积高度越小;剪切过程中充填物堆积形式和位置不断变化,进而影响裂隙隙宽和剪切强度。



(a) σ_n=1.27 MPa上试件



(b) σ_n=1.27 MPa下试件



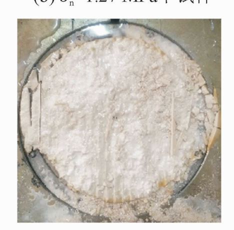
(c) σ_n=1.59 MPa上试件



(d) σ_n=1.59 MPa下试件



(e) σ_n=2.23 MPa上试件



(f) σ_n=2.23 MPa下试件



(g) σ_n=2.55 MPa上试件



(h) σ_n=2.55 MPa下试件

图 3　不同法向应力作用下试验结果

Fig. 3　Test results of test-pieces under different normal stress

不同 σ_n作用下剪切强度 τ 随 δ 的变化规律图 4 所示,法向位移增量 Δu 随 δ 的变化规律如图 5 所示。图 4 中剪切强度曲线可划分为初始峰值阶段、中间软化阶段和峰后残余阶段,峰值剪切强度 τ_p决定着裂隙的极限抗剪能力。并且 τ_p与 σ_n之间呈现明显的正相关关系,当 σ_n增大时裂隙破坏面夹角和裂隙面摩擦力随之增大,裂隙抗剪强度提升,当 σ_n从 1.27 MPa 增大至 2.55 MPa 时,τ_p从 5.28 MPa 增大至 9.95 MPa。此外,峰值剪切位移 δ_p之后的剪切强度主要来源于裂隙面、充填物之间的摩擦和破坏充填物时的抵抗力,此时充填物的大小、分布和堆积形式对软化和残余剪切强度影响显著。从图 5 中可以看出,Δu 呈现出明显的剪缩、剪胀和平缓阶段。剪缩阶段主要由剪切初期裂隙的进一步压实吻合造成,随后随着裂隙面之间的相互错动爬升使 Δu 进入剪胀阶段,最后随着裂隙面的破坏进入平缓阶段。并且 σ_n越大,Δu 越小,当 σ_n从 1.27 MPa 增大至 2.55 MPa 时,Δu 从 0.87 mm 减小至 0.50 mm。此外,Δu 稳定值同时受到充填物大小、分布和堆积形式的影响。

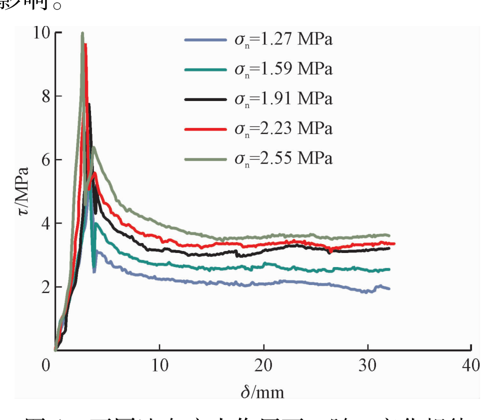


图 4 不同法向应力作用下 τ 随 δ 变化规律

Fig. 4 Relation between τ and δ under different normal stress

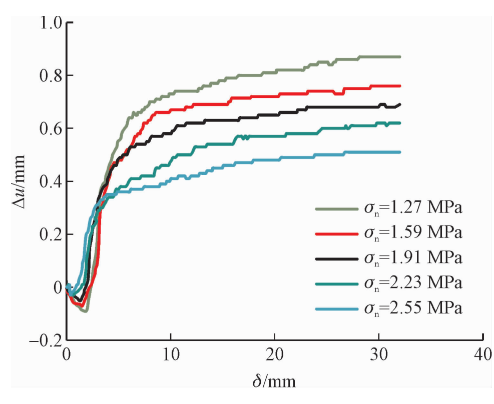


图 5 不同法向应力作用下 Δu 随 δ 变化规律

Fig. 5 Relation between Δu and δ under different normal stress

2.2 峰后剪胀经验模型和峰后剪切强度模型确定

规则齿裂隙面 τ_p可通过 PATTON 公式计算,其中 τ_p与基本摩擦角 φ_b、剪胀角 i 的关系如下[10]

$$\tau_p = \sigma\tan(\varphi_b + i) \tag{1}$$

式中:φ_b为基本摩擦角;i 为剪胀角。

对于本研究试验,i 为规则齿起伏度,即 30°。φ_b值为光滑裂隙面摩擦角(图 6),通过光滑裂隙剪切强度 τ_s和法向应力关系曲线确定。

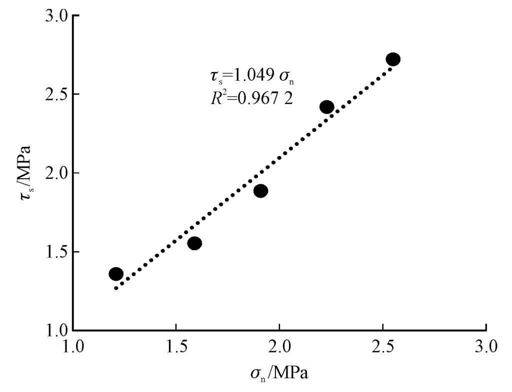


图 6 光滑结构面 σ_n与 τ_s拟合结果

Fig. 6 Matching relation of σ_n and τ_s of the specimen with smooth joint

将图 6 中的拟合关系和裂隙面规则齿起伏度代入式(1)可反算得到 φ_b约为 46.4°,同时可得到不同法向应力 σ_n作用下峰值剪切强度 τ_p计算值与试验值比较(表 2)。

表 2 τ_p计算值与试验值对比

Tat. 2 Calculated and experimental values of τ_p

σ_n/MPa	τ_p试验值/MPa	τ_p计算值/MPa
1.27	5.28	5.01
1.59	6.88	6.57
1.91	7.74	7.89
2.23	9.61	9.22
2.55	9.95	10.54

从表 2 中可以看出,τ_p计算结果和试验结果吻合度较高。然而 PATTON 公式只能计算裂隙 τ_p值,裂隙峰后软化和残余剪切强度同样是评价岩体稳定性的重要参数。由于剪切破坏和充填物的影响,导致峰后 δ 和 Δu 之间呈现非线性关系,导致 i 不断变化且难以测量。剪切过程中 i 可通过式(2)计算得到。

$$i = \arctan\frac{\Delta u}{\Delta\delta} \tag{2}$$

式中,$\Delta\delta$ 为 Δu 对应的剪切位移变化量。

为了统一量纲,本研究定义任意时刻的 δ 为 δ_i,总剪切位移为 δ_t,i 随 δ_i/δ_t 的变化过程如图 7 所示。

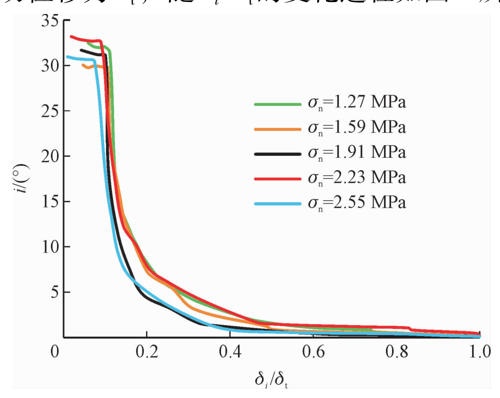


图 7　不同法向应力作用下 i 随 δ_i/δ_t 变化规律

Fig. 7　Relation of i and δ_i/δ_t under different normal stress

图 7 结果表明:不同法向应力作用下裂隙初始剪胀角接近 30°,并且随着 δ 的不断增大,i 值变化过程分为明显的 3 个阶段。初始阶段裂隙面规则齿破坏,i 值迅速降低;中间阶段大粒径充填物被不断研磨,i 值非线性减小;末尾阶段 i 值趋于稳定。i 值的变化趋势接近裂隙剪切强度变化趋势,同样呈现出明显的快速降低阶段、软化降低阶段和残余降低阶段。整体上 i 与 δ_i/δ_t 的关系式为

$$i = a\,(\delta_i/\delta_t)^{b} \tag{3}$$

式中,a 和 b 为拟合参数。

相关结果表明影响 i 的主要参数包括裂隙壁面强度(JCS)和 σ_n [13-14],本研究构建了 JCS/σ_n 与式(3)拟合参数 a、b 的关系曲线,如图 8 和图 9 所示。

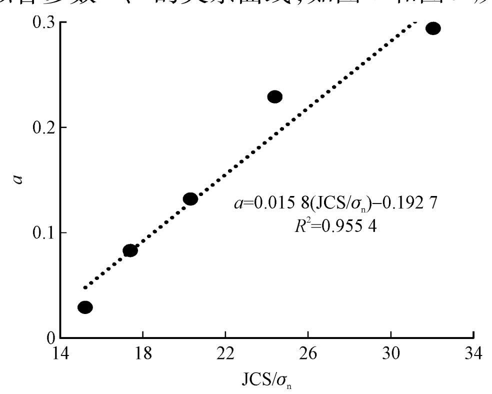


图 8　i-δ_i/δ_t 曲线拟合参数 a 与 JCS/σ_n 关系曲线

Fig. 8　Evolution of parameter a of curve i-δ_i/δ_t with changed JCS/σ_n

对图 8 和图 9 中的曲线进行回归分析,可得到 a、b 分别与 JCS/σ_n 的数学关系为

$$\begin{cases} a = 0.015\,8\dfrac{\mathrm{JCS}}{\sigma_n} - 0.192\,7 \\ b = 0.434\,4\ln\left(\dfrac{\mathrm{JCS}}{\sigma_n}\right) - 3.585\,7 \end{cases} \tag{4}$$

联立式(3)及式(4)可得到全剪切过程中 i 的计算公式为

$$i = \left(0.015\,8\frac{\sigma_n}{\mathrm{JCS}} - 0.192\,7\right)(\delta_i/\delta_t)^{0.434\,4\ln\left(\frac{\mathrm{JCS}}{\sigma_n}\right)-3.585\,7} \tag{5}$$

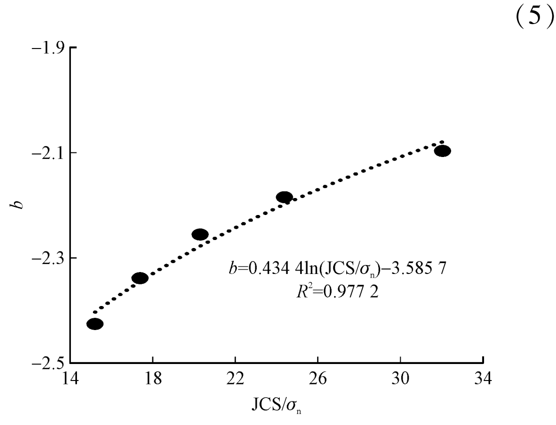


图 9　i-δ_i/δ_t 曲线拟合参数 b 与 JCS/σ_n 关系曲线

Fig. 9　Evolution of parameter b of curve i-δ_i/δ_t with changed JCS/σ_n

联立式(1)及式(5)可计算得到裂隙软化剪切强度和残余剪切强度。然而由于充填物的影响,采用式(1)计算软化及残余剪切强度并继续采用 φ_b 时会忽略裂隙面与充填物、充填物与充填物之间的摩擦力,以及研磨充填物时带来的抵抗力。对于此本研究引入参数 f 对 φ_b 进行修正,通过试验确定 f 值为 1.24。修正后的裂隙全剪切强度计算公式为

$$\tau = \begin{cases} \sigma\tan(\varphi_b + i_p), & \delta < \delta_p \\ \sigma\tan\left[1.24\varphi_b + \left(0.015\,8\dfrac{\sigma_n}{\mathrm{JCS}} - 0.192\,7\right)(\delta_i/\delta_t)^{0.434\,4\ln\left(\frac{\mathrm{JCS}}{\sigma_n}\right)-3.585\,7}\right], & \delta > \delta_p \end{cases} \tag{6}$$

3　水流非线性变化规律研究

3.1　FORCHHEIMER 定律

FORCHHEIMER 定律数学形式为[29]

$$-\nabla P = AQ + BQ^2 \tag{7}$$

式中:$-\nabla P$ 为压力梯度;A、B 分别为线性和非线性系数;Q 为通过裂隙的流量。

应用 FORCHHEIMER 定律的前提是判断水流流态,进而确定 B 值是否为 0。渗流过程中常用水流雷诺数 Re 和临界雷诺数 Re_c 判断水流流态,当 $Re > Re_c$ 时可认为发生非线性渗流。Re 可通过下式确定

$$Re = \frac{\rho \bar{u} D}{\mu} = \frac{\rho Q}{\mu w} \tag{8}$$

式中:ρ 为水流密度;$\bar{u}$ 为水流平均速度;D 为与裂隙形貌尺寸相关的参数;μ 为水流动力黏滞系数;w 为裂隙宽度。

以 FORCHHEIMER 定律为基础,ZENG 等[30]定义了水流非线性判断系数 E 计算 Re_c。

$$E = \frac{BQ^2}{AQ + BQ^2} \tag{9}$$

令 $E=10\%$,将式(9)代入式(8)则可得到 Re_c 计算公式[31],即

$$Re_c = \frac{\rho \bar{u} D}{\mu} = \frac{A\rho}{9B\mu w} \tag{10}$$

3.2 FORCHHEIMER 定律系数变化规律

当 $\sigma_n = 1.91$ MPa 时 $-\nabla P$ 和 Q 关系曲线如图 10 所示。

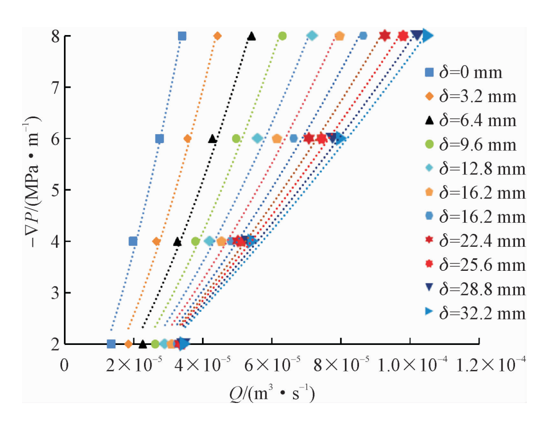


图 10 以 FORCHHEIMER 定律为基础的 $-\nabla P$ 与 Q 关系曲线

Fig. 10 Curve of $-\nabla P$ and Q based on FORCHHEIMER's law

剪切过程中 FORCHHEIMER 定律线性系数 A 和非线性系数 B 变化过程如图 11 及图 12 所示。

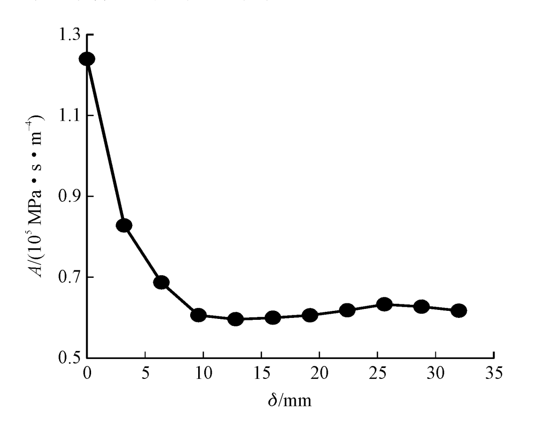


图 11 系数 A 随 δ 变化规律

Fig. 11 Relation between coefficient A and δ

图 11、图 12 结果表明 A、B 均随着 δ 的增大而减小,其中 B 的变化较为缓慢。非剪切状态下 A、B 取值一般为定值,本研究结果表明剪切破坏过程中 A、B 取值和水流流态处于复杂的变化过程,并同时受到隙宽变化和充填物的共同影响。从式(6)的数学关系可以看出,当 $-\nabla P$ 固定时,剪切过程中隙宽不断增大,裂隙过流能力增强,导致 Q 增大,A、B 减小。此外,A 与裂隙渗透率成反比,说明剪胀和充填物影响下,裂隙渗透率增大。而 B 值越小,说明裂隙中水流非线性程度有所降低,充填物使隙宽分布较为均匀,流态趋于平稳,惯性力引起的水流能量损失降低。

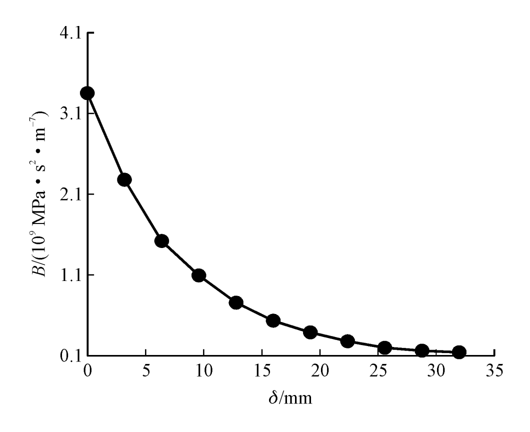


图 12 系数 B 随 δ 变化规律

Fig. 12 Relationship between coefficient B and δ

3.3 临界雷诺数变化规律

Re_c随 δ_i/δ_t变化曲线如图 13 所示。

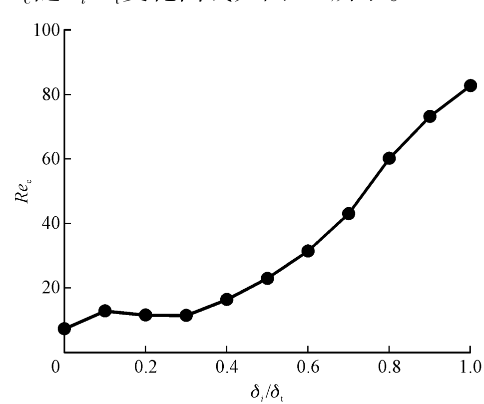


图 13 Re_c随 δ 变化规律

Fig. 13 Relation of Re_c and δ under

从图 13 可以看出,Re_c随剪切作用的持续进行而不断增大,变化范围为 7.238 ~ 82.730,说明水流转换为非线性流态的临界点不断上升,这与 B 的变化原因一致,并且由于充填物的影响,当 $\delta_i/\delta_t > 0.4$ 后 Re_c增幅明显。此外,Re_c与 δ_i/δ_t之间关系为

$$Re_c = 7.201 e^{0.078(\delta_i/\delta_t)} \tag{11}$$

4 结　论

本研究以岩体单裂隙为研究对象,开展了剪切-渗流耦合试验研究,揭示了剪切过程中裂隙剪切强度、法向变形和非线性渗流特性的演化过程,主要结论如下。

1)随着剪切破坏的进行,裂隙剪切强度变化曲线呈现明显的峰值、软化和残余阶段。裂隙峰值剪切强度和法向压力呈明显的正相关关系,剪切破坏产生碎屑充填的分布、堆积形式对峰后剪切强度和法向位移增量影响显著。

2)全剪切过程中剪胀角的演化过程同时受到法向应力、剪切位移、裂隙壁面刚度的影响,本研究以PATTON 公式为基础结合建立的剪胀公式,构建了全剪切过程剪切强度计算公式,能够准确描述裂隙峰值剪切强度和峰后剪切强度。

3)剪切破坏引起的隙宽变化对裂隙渗流特性影响显著,并且由于水流惯性力的作用,高渗压作用下裂隙非线性渗流特性显著。由于隙宽和充填物的影响,FORCHHEIMER 定律线性项和非线性项系数随剪切位移呈现先降低后稳定的非线性变化过程,同时本研究构建的临界雷诺数计算公式可用于判断裂隙渗流流态。

参考文献:

[1] 甘磊, 金洪杰,沈振中,等. 围压和渗压加卸载作用下石灰岩裂隙渗流特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2023,45(10):2062-2071.
GAN Lei,JIN Hongjie,SHEN Zhenzhong,et al. Experimental study on seepage characteristics of rough fracture of limestone under loading-unloading of confining and osmotic pressures[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2023,45(10):2062-2071(in Chinese).

[2] 赵阳升. 岩体力学发展的一些回顾与若干未解之百年问题[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(7):1297-1336.
ZHAO Yangsheng. Retrospection on the development of rock mass mechanics and the summary of some unsolved centennial problems[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2021,40(7):1297-1336(in Chinese).

[3] 朱红光,易成,谢和平,等. 基于立方定律的岩体裂隙非线性流动几何模型[J]. 煤炭学报,2016,41(4):822-828.
ZHU Hongguang, YI Cheng, XIE Heping, et al. A new geometric model for non-linear flow in rough-walled fractures based on the cubic law[J]. Journal of China Coal Society,2016,41(4):822-828(in Chinese).

[4] CHEN Y D,LIAN H J,LIANG W G,et al. The influence of fracture geometry variation on non-darcy flow in fractures under confining stresses[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2019,113:59-71.

[5] CAO C,XU Z G,CHAI J R,et al. Radial fluid flow regime in a single fracture under high hydraulic pressure during shear process[J]. Journal of hydrology,2019,579:124142.

[6] 覃源,张鑫,柴军瑞,等. 模拟不同节理粗糙度对单裂隙渗流的影响[J]. 应用力学学报,2020,37(1):455-462.
QIN Yuan,ZHANG Xin,CHAI Junrui,et al. Simulating the influence of different joint roughness on single-fracture seepage[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(1):455-462(in Chinese).

[7] 陈欣,周小涵,许彬,等. 裂隙岩体宏细观剪切损伤力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(12):2509-2521.
CHEN Xin, ZHOU Xiaohan, XU Bin, et al. Investigation on the macro-meso shear damage mechanical behaviors of fractured rocks[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2022,41(12):2509-2521(in Chinese).

[8] 李樯,马丹,张吉雄,等. 断层带破碎岩体采动剪切变形与渗透性演化规律[J]. 煤田地质与勘探,2023,51(8):150-160.
LI Qiang, MA Dan, ZHANG Jixiong, et al. Mining-induced shear deformation and permeability evolution law of crushed rock mass in fault zone[J]. Coal geology & exploration,2023,51(8):150-160(in Chinese).

[9] KATSUKI D, GUTIERREZ M, ALMRABAT A. Stress-dependent shear wave splitting and permeability in fractured porous rock[J]. Journal of rock mechanics and geotechnical engineering,2019,11(1):1-11.

[10] PATTON F D. Multiple modes of shear failure in rock[C]//1st ISRM Congress. Richardson, Texas, USA: OnePetro, 1966: ISRM-1CONGRESS-1966-087.

[11] JAEGER J C. Friction of rocks and stability of rock slopes[J]. Géotechnique,1971,21(2):97-134.

[12] 沈明荣,张清照. 规则齿型结构面剪切特性的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(4):713-719.
SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Experimental study of shear deformation characteristics of rock mass discontinuities[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2010,29(4):713-719(in Chinese).

[13] BARTON N,CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock mechanics,1977,10(1):1-54.

[14] 唐志成,夏才初,宋英龙,等. Grasselli 节理峰值抗剪强度公式再探[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(2):356-364.
TANG Zhicheng,XIA Caichu,SONG Yinglong,et al. Discussion about Grasselli's peak shear strength criterion for rock joints[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2012,31(2):356-364(in Chinese).

[15] GRASSELLI G, WIRTH J, EGGER P. Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing[J]. International journal of rock mechanics and mining

sciences,2002,39(6):789-800.

[16] 肖维民,余欢,李锐,等.薄层充填岩石节理抗剪强度特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增刊2):3420-3428.
XIAO Weimin,YU Huan,LI Rui,et al. Experimental research on the shear strength of thinly-infilled rock joints during shearing[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2019,38(S2):3420-3428(in Chinese).

[17] 丁林楠,柴军瑞,覃源,等.节理峰值剪切强度公式修正研究[J].应用力学学报,2021,38(2):811-817.
DING Linnan,CHAI Junrui,QIN Yuan,et al. Research on correction of joint peak shear strength criterion[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(2):811-817(in Chinese).

[18] 张重远,窦子豪,周伦仕,等.酸蚀作用对岩石裂隙剪切行为的影响规律研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(增刊1):3256-3265.
ZHANG Chongyuan, DOU Zihao, ZHOU Lunshi, et al. Effect of acid corrosion on shear behaviors of rock fractures[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2023,42(S1):3256-3265(in Chinese).

[19] 赵鹏,冯子军,南翰墨,等.花岗岩干热岩体裂隙的大位移动态剪切-渗流特征[J].煤炭学报,2023,48(3):1139-1154.
ZHAO Peng, FENG Zijun, NAN Hanmo, et al. Characteristics of large-displacement based dynamic shearing-flow through the fractures in the granitic hot dry rock mass[J]. Journal of China Coal Society,2023,48(3):1139-1154(in Chinese).

[20] RUTTER E H,MECKLENBURGH J. Influence of normal and shear stress on the hydraulic transmissivity of thin cracks in a tight quartz sandstone,a granite, and a shale[J]. Journal of geophysical research:solid earth,2018,123(2):1262-1285.

[21] 李博,汪佳飞,刘日成,等.岩石裂隙压剪变形破坏与非线性渗流特性[J].工程科学与技术,2021,53(6):103-112.
LI Bo,WANG Jiafei,LIU Richeng,et al. Deformation,failure and nonlinear flow characteristics of a fracture subject to normal stress and shear displacement[J]. Advanced engineering sciences,2021,53(6):103-112(in Chinese).

[22] 夏才初,喻强锋,钱鑫,等.常法向刚度条件下岩石节理剪切-渗流特性试验研究[J].岩土力学,2020,41(1):57-66.
XIA Caichu,YU Qiangfeng,QIAN Xin,et al. Experimental study of shear-seepage behaviour of rock joints under constant normal stiffness[J]. Rock and soil mechanics,2020,41(1):57-66(in Chinese).

[23] YIN Q,MA G W,JING H W,et al. Hydraulic properties of 3D rough-walled fractures during shearing:an experimental study[J]. Journal of hydrology,2017,555:169-184.

[24] 蔚立元,杨瀚清,王晓琳,等.循环剪切作用下三维粗糙裂隙非线性渗流特性数值模拟研究[J].岩土力学,2023,44(9):2757-2766.
YU Liyuan,YANG Hanqing,WANG Xiaolin,et al. Numerical study on nonlinear hydraulic properties of three-dimensional rough joints under cyclic shear conditions[J]. Rock and soil mechanics,2023,44(9):2757-2766(in Chinese).

[25] XIONG X B,LI B,JIANG Y J,et al. Experimental and numerical study of the geometrical and hydraulic characteristics of a single rock fracture during shear[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2011,48(8):1292-1302.

[26] 陈益峰,周创兵,盛永清.考虑峰后力学特性的岩石节理渗流广义立方定理[J].岩土力学,2008,29(7):1825-1831.
CHEN Yifeng,ZHOU Chuangbing,SHENG Yongqing. A generalized cubic law for seepage flow through rock joints considering post-peak mechanical response[J]. Rock and soil mechanics,2008,29(7):1825-1831(in Chinese).

[27] 赵延林,万文,王卫军,等.随机形貌岩石节理剪切-渗流数值模拟和剪胀-渗流模型[J].煤炭学报,2013,38(12):2133-2139.
ZHAO Yanlin,WAN Wen,WANG Weijun,et al. Shear-seepage numerical simulation and shear dilatancy-seepage model of rock joint with random morphology[J]. Journal of China Coal Society,2013,38(12):2133-2139(in Chinese).

[28] VILARRASA V, KOYAMA T, NERETNIEKS I, et al. Shear-induced flow channels in a single rock fracture and their effect on solute transport[J]. Transport in porous media,2011,87(2):503-523.

[29] CANBOLAT S, PARLAKTUNA M. Analytical and visual assessment of fluid flow in fractured medium[J]. Journal of petroleum science and engineering,2019,173:77-94.

[30] ZENG Z W,GRIGG R. A criterion for non-darcy flow in porous media[J]. Transport in porous media,2006,63(1):57-69.

[31] ZIMMERMAN R W,AL-YAARUBI A,PAIN C C,et al. Non-linear regimes of fluid flow in rock fractures[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2004,41(3):384.

(编辑 张璐)